

AVALIAÇÃO ECONÓMICA PRELIMINAR DA NANOFILTRAÇÃO NA REMOÇÃO DE CIANOTOXINAS EM ÁGUA NATURAIS

Lucília SILVA

Estudante do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, algarsilva@sapo.pt

Helena LUCAS

Engª do Ambiente, Águas do Algarve, h.lucas@aguasdoalgarve.pt

Margarida RIBAU TEIXEIRA

Doutorada em Tecnologias do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, mribau@ualg.pt

RESUMO

Com este trabalho pretende-se quantificar os custos associados à implementação e exploração de um sistema de nanofiltração (NF) na Estação de Tratamento de Águas (ETA) de Alcantarilha da Águas do Algarve, S.A. com uma capacidade de operação de 259.000 m³/d e efectuar uma comparação com os custos do actual sistema de tratamento implementado.

A quantificação dos custos actuais foi efectuada através de dados obtidos a partir das operações desenvolvidas na ETA de Alcantarilha, fornecidos pelas Águas do Algarve, S.A. relativos a 2008 e 2009. Os custos foram estimados para as diferentes etapas de tratamento. Os resultados revelaram um custo associado ao tratamento de água para consumo humano de cerca de 0,10 €/m³.ano, para o esquema de tratamento existente na ETA de Alcantarilha.

Realizaram-se ensaios experimentais à escala laboratorial e piloto onde se avaliou e optimizou o sistema de NF na remoção de matéria orgânica natural e cianotoxinas para diferentes taxas de recuperação de água (TxR), com águas que abastecem a actual ETA de Alcantarilha. A partir dos resultados obtidos com o estudo à escala piloto, verificou-se que a NF tem capacidade de produzir água de elevada qualidade com concentrações de microcistina muito inferiores ao valor legislado (1 µg/L), e baixo teor em matéria orgânica natural e de anatoxina- a, e que esta deve operar a TxR de pelo menos 75%.

Com base nos resultados experimentais e através de modelos já desenvolvidos a partir de dados obtidos em trabalhos anteriormente realizados, determinaram-se os custos associados ao sistema de NF. O custo total estimado de implementação e operação/manutenção foi de 0,21 €/m³.ano para o ano de 2025. Conclui-se que apesar da implementação da NF na ETA de Alcantarilha provoque um acréscimo do custo de tratamento face ao tratamento convencional, este poderá ser justificável face à qualidade da água obtida.

Palavras-chave: Nanofiltração, cianotoxinas, modelos económicos, viabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da contaminação das massas de água naturais e a maior exigência na qualidade da água para consumo humano, contribuíram para o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento de água que complementam os tratamentos convencionais. Uma destas tecnologias é a nanofiltração (NF) que tem vindo a ser utilizada na remoção de compostos de baixo peso molecular para a produção de água potável (RAUTENBACH e GRÖSCHL, 1990). Entre esses compostos estão as cianotoxinas (RIBAU e ROSA, 2005), cuja remoção das águas é essencial já que a sua presença, mesmo em baixas concentrações, representa um risco para a saúde pública devido à sua elevada toxicidade.

A nanofiltração consiste num sistema de filtração por membranas, em que a membrana funciona como uma barreira semi-permeável entre duas fases, a primeira fase corresponde à alimentação e a segunda fase corresponde ao permeado. O transporte através da membrana ocorre quando uma força matriz é aplicada, podendo esta ser a diferença de pressão, a diferença de concentração ou a diferença de potencial eléctrico ou de temperatura entre as duas fases. A força matriz do processo de NF corresponde à diferença de pressão, operando entre os 10 e os 25 bar (MULDER, 1997).

A NF oferece diversas vantagens em relação ao tratamento convencional, como a utilização de unidades mais compactas e com maior automatização, produção de água tratada de elevada qualidade (obedecendo aos parâmetros mais restritivos da legislação referente a águas para consumo humano), simplicidade de operação, facilidade de ampliação da escala e, em geral, permite diminuir a utilização de produtos químicos no tratamento (KAWAMURA, 2000). Uma das principais vantagens das membranas NF deve-se à capacidade de remoção de bactérias e de matéria orgânica natural, promovendo um baixo potencial na formação de substâncias nocivas resultantes de subprodutos da desinfecção e em alguns casos à remoção de iões multivalentes (LIIKANEN *et al.*, 2006). No entanto, subsistem vários obstáculos que condicionam a sua implementação como a qualidade da água de alimentação, o consumo energético, o volume de água perdida no concentrado e os custos (LIIKANEN *et al.*, 2006; ELAZHAR *et al.*, 2009).

O custo corresponde ao factor mais importante quando se pretende implementar um sistema por membranas. No entanto, o custo depende de diversos factores como o *design* do sistema, as condições de funcionamento e a capacidade de instalação (COSTA e PINHO, 2006). Assim sendo quando se pretende instalar um processo de NF, este deve ser técnica e economicamente viável, devendo-se encontrar um equilíbrio entre o desempenho e os custos de implementação e operação (ELAZHAR *et al.*, 2009; LIIKANEN *et al.*, 2006).

A avaliação económica de um sistema requer a determinação dos custos de implementação (capital), de manutenção e operação ao longo do seu tempo de vida útil (ELAZHAR *et al.*, 2009).

Os custos de implementação de uma forma geral incluem a construção e a aquisição de todos os equipamentos necessários para garantir o funcionamento do sistema, como os módulos de NF, as bombas, os sistemas de controlo, a tubagem, as válvulas e os tanques de armazenamento, mão-obra, entre outros (ELAZHAR *et al.*, 2009). A estimativa dos custos associados à implementação do sistema de NF tem sido baseada essencialmente em dois métodos: através de dados obtidos em instalações à escala piloto e/ou à escala real de diferentes sistemas (ELAZHAR *et al.*, 2009) ou através da utilização de modelos estatísticos de estimativa de custos (ALI *et al.*, 2005; COSTA e PINHO, 2006).

Os custos de operação e manutenção incluem todas as actividades que garantem o funcionamento do sistema como o consumo energético, a substituição e limpeza da membrana, os produtos

químicos utilizados no pré e pós tratamento e a eliminação do concentrado (COSTA e PINHO, 2006). A estimativa dos custos associados à operação e manutenção pode basear-se nos custos obtidos em unidades implementadas à escala real (COSTA e PINHO, 2006), ou em modelos de avaliação económica como o modelo desenvolvido por Verbeme e Wouters utilizado no estudo de ALI *et al.* (2005).

COSTA e PINHO (2006) realizaram a avaliação económica da implementação de uma unidade de NF para tratamento da água do rio Tejo para consumo humano. A unidade tinha uma capacidade de tratamento de 100.000 m³/d, utilizando uma membrana com configuração em módulos enrolados em espiral e operando a uma pressão de 6 bar. Os resultados obtidos indicaram que o custo da água tratada é de 0,214 €/m³ e que o tratamento da água do rio Tejo por NF é aparentemente economicamente viável.

LIIKANEN *et al.* (2006) elaboraram um estudo sobre a avaliação económica da implementação de um sistema de NF no sentido de melhorar o tratamento convencional (ozonização, coagulação, flotação, filtração e desinfecção) com base em ensaios à escala piloto e em instalações à escala real. Analisaram a variação da pressão (4-7 bar) e a eficiência de recuperação de água a 68% a 83%. O tratamento convencional de água teve um custo de 0,17 €/m³ e a instalação do sistema de NF proporcionou um aumento de 0,11€/m³ do custo da água tratada (LIIKANEN *et al.*, 2006).

Com este trabalho pretende-se quantificar os custos associados à implementação e exploração de um sistema de NF na Estação de Tratamento de Águas (ETA) de Alcantarilha da Águas do Algarve, S.A. (a instalar após a etapa de decantação) e efectuar uma comparação com os custos do actual sistema de tratamento implementado.

A ETA de Alcantarilha tem uma capacidade máxima de produção de 259.000 m³/dia, repartida por três linhas de tratamento em paralelo, de forma a responder às necessidades de abastecimento de água no ano horizonte de projecto (2025), tanto em época alta como em época baixa. A alimentação é efectuada a partir das albufeiras do Funcho e de Odelouca. O sistema de tratamento instalado é convencional com pré-oxidação e apresenta as seguintes etapas (figura 1): pré-oxidação, mistura rápida, coagulação/floculação/decantação, filtração, desinfecção e ajuste de pH. Na etapa de coagulação é muitas vezes adicionado carvão activado em pó. Paralelamente ao sistema de tratamento água funciona a linha de tratamento das lamas resultantes dos processos de decantação e filtração AdA (2009).

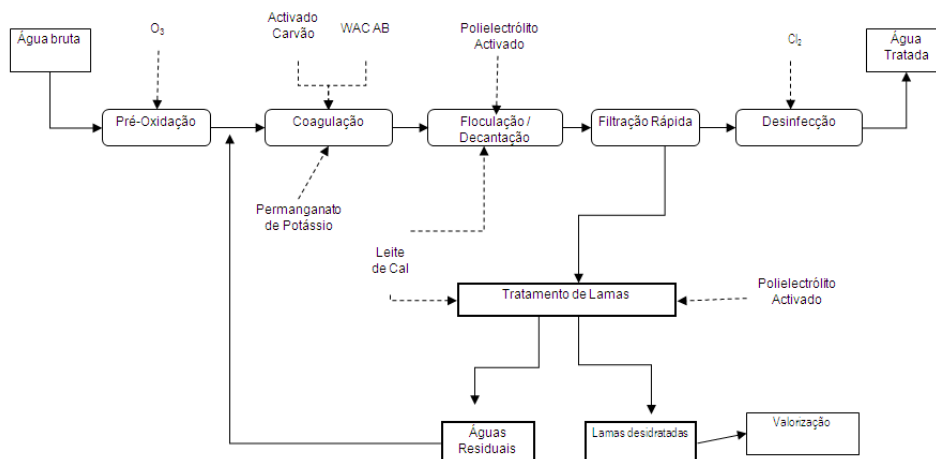


Figura 1 Esquema de tratamento da ETA de Alcantarilha (LUCAS *et al.*, 2001)

2 METODOLOGIA

2.1 Ensaios experimentais

Neste estudo foram realizados ensaios experimentais com o objectivo de avaliar a variação de fluxo e a qualidade do permeado com a taxa de recuperação de água (TxR). Nesse sentido avaliou-se o permeado em termos de fluxo (J), e remoção (f) de carbono orgânico dissolvido (DOC), condutividade e concentração de cianotoxinas, designadamente microcistinas e anatoxina-a.

Os ensaios experimentais foram realizados pela equipa de laboratório utilizando uma instalação piloto comercial de NF (M20, pressão máxima 80 bar, caudal máximo 18 L/min a temperatura constante através de um permutador de calor), usando módulos enrolados em espiral (M20-2.5") e uma membrana NF99 (Alfa Laval) num total de 0,72 m² de área. A membrana usada tinha uma permeabilidade hidráulica de 3,228 kg/(h.m².bar) (r²=0,9965, 25 °C), um *cut-off* de ca. 180 Da e é negativa a pH neutro (RIBAU TEIXEIRA *et al.*, 2005).

As amostras de água utilizadas nos ensaios foram recolhidas após a etapa de decantação na ETA de Alcantarilha entre Junho de 2010 e Abril de 2011. Foram estudados dois tipos de água, a água decantada (DW) e a mistura água decantada com microcistina (MC), produzida em laboratório, e anatoxina-a (ANTX), reagente puro, ambas com uma concentração de 10 µg/l (DW+MC+ANTX), uma vez que não ocorreram fluorescências de cianobactérias durante o período experimental.

Os ensaios decorreram durante 100 horas de operação a uma pressão de 10 bar e uma temperatura de 25°C. Efectuaram-se seis ensaios diferentes para simular as distintas TxR de 0%, 50% e 75% para os dois tipos de água. A taxa de recuperação é definida pela Eq. (1) e a remoção dos diferentes parâmetros pela Eq. (2).

$$TxR = (Vp/Va) \times 100 \quad (1)$$

em que:

TxR – taxa de recuperação de água (%)

Vp – volume de permeado (m³)

Va – volume do tanque de alimentação (m³)

$$f = (Cb - Cp) / Cp \times 100 \quad (2)$$

em que:

f – remoção (%)

C_b – concentração na alimentação (mg/l)

C_p – concentração no permeado (mg/l)

Simulou-se a TxR de 0% desenvolvendo os ensaios com recirculação total, ou seja, o volume de permeado e de concentrado foram encaminhados para o tanque de alimentação durante as 100h de operação. Para a simulação das TxR de 50% e 75% os ensaios desenvolveram-se em duas fases, a primeira em que o volume de permeado é recolhido até que o volume no tanque de alimentação atinja o equivalente a 50 e 75 % do volume inicial. Na segunda fase continuou-se a realizar o ensaio com recirculação total do permeado e concentrado durante as 100h de operação.

O procedimento experimental e os métodos utilizados na determinação dos parâmetros analisados seguiram as metodologias descritas nos estudos de RIBAU TEIXEIRA e ROSA (2005) e RIBAU TEIXEIRA e ROSA (2006).

2.2 Estimativa de custos

2.2.1 Custos actuais

A estimativa dos custos actuais da ETA de Alcantarilha teve por base as despesas inerentes às principais actividades desenvolvidas no processo de tratamento, que foram facultadas pela Águas do Algarve, S.A. relativas ao ano de 2008 e 2009. No sentido de avaliar separadamente o contributo das diferentes etapas do processo de tratamento face ao custo total, dividiu-se o custo total nas seguintes componentes: custos dos reagentes, custo de operação e manutenção, custos energéticos e custos de remoção e valorização das lamas. Desta forma, obteve-se um custo associado ao tratamento por metro cúbico de água tratada através da Eq. (3).

$$C_{at} = (C_r + C_m + C_o + C_e + C_i) / Q_t \quad (3)$$

em que:

C_{at} – custo total actual (€/m³.ano)

C_r – custo dos reagentes (€)

C_m – custo de manutenção (€)

C – custo de operação (€)

C_{e v} - custo energéticos (€)

C_{it} – custo da remoção de lamas (€)

Q_t – capacidade da unidade (m³/ano)

2.2.2 Custos do sistema de NF

Os custos associados ao sistema da NF foram divididos em custos de implementação e custos de operação e manutenção. A sua estimativa baseou-se em modelos e dados de trabalhos desenvolvidos anteriormente (ADHAM *et al.*, 1996, GERALDES *et al.*, 1995, CYNA *et al.*, 2002, GORENFLO *et al.*, 2002, COSTA e PINHO *et al.*, 2006).

A estimativa dos custos de investimento desenvolveu-se tendo em conta a capacidade de produção do sistema de membranas, através da equação desenvolvida por ADHAM *et al.* (1996), baseada em custos de unidades de Ultrafiltração (UF) e Microfiltração (MF) já existentes, que relacionam o custo de implementação (incluindo os módulos membranas, válvulas, tubagem, sistemas de bombagem, sistemas de instrumentação e controle, equipamentos de lavagem, instalações, sistemas de alimentação e distribuição de energia eléctrica) com a sua capacidade de tratamento, considerando a conversão do dólar canadiano de 1\$/1€ em 2011 (Eq. 4).

$$C_i = 55.961,66 (Q_a)^{0,60} \quad (4)$$

em que:

C_i – custo de investimento (€)

Q_a – Capacidade da unidade (m^3/h)

Após a estimativa do custo de investimento determinou-se a amortização deste custo, multiplicando o custo de investimento pelo factor de amortização do capital (f_a) que é definido pela Eq. (5), considerando o período de retorno do investimento (n), o tempo de vida útil do projecto de 15 anos, e uma taxa de retorno do investimento (i) de 8% (GERALDES *et al.*, 1995).

$$f_a = [i(1+i)^n] / [(1+i)^n - 1] \quad (5)$$

em que:

f_a – factor de amortização (-)

n – período de retorno (ano)

i – taxa de retorno (-)

De forma a obter a amortização do custo de capital expresso em €/m³ utilizou-se a Eq. (6) proposta por GERALDES *et al.* (1995).

$$A_c = (f_a C_i) / Q_p \quad (6)$$

em que:

A_c – amortização do custo de investimento (€/m³)

Q_p – caudal de permeado (m^3/ano)

O contributo dos custos associados à manutenção e operação do sistema foram estimados através da análise de estudos desenvolvidos nesta área. Os custos de operação e manutenção estimados englobam as despesas com o pré-tratamento, consumo energético, químicos, substituição das membranas, desinfecção, deposição do concentrado e serviços de manutenção do equipamento.

De acordo com objectivo deste estudo, em que a NF utilizará como pré-tratamento operações já existentes na ETA, considerou-se que alguns custos de operação e manutenção são comuns aos dois sistemas. Nesse sentido, o pré-tratamento da NF será composto pelas etapas de pré-oxidação, coagulação, floculação e decantação do sistema de tratamento actual e a desinfecção também será realizada segundo o sistema actual.

A estimativa dos custos energéticos calculou-se a partir do consumo do sistema de bombagem que garante a alimentação tanto a nível de caudal como da pressão, estabelecendo-se esse valor de 0,35 kWh/m³ de acordo como o estudo de CYNA *et al.* (2002) sobre o desempenho do sistema de NF da estação de tratamento de Mery-Sur-Oise durante os anos de 2000 e 2001 e um custo da energia de 0,11 €/kWh. Neste trabalho considerou-se que os custos de manutenção serão de 0,01 €/m³ baseado no estudo GORENFLO *et al.* (2002). Em relação aos custos relacionados com químicos, substituição das membranas e deposição do concentrado consideraram-se os custos obtidos no estudo de COSTA e PINHO (2006) sobre a estimativa do custo de uma unidade de NF, onde obtiveram respectivamente os seguintes valores 0,017 €/m³, 0,010 €/m³ e 0,037 €/m³, uma vez que não foi possível obter dados junto das empresas por impossibilidade demonstrada pelas próprias empresas em facultar dados.

Por último o custo total do tratamento de NF por volume de água tratada corresponde ao somatório dos custos de investimento, operação e manutenção, e amortização do custo de capital.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho da NF

A figura 2 representa a variação de fluxo de permeado (J) durante as 100h de operação do sistema de NF face ao fluxo inicial de água desionizada às diferentes TxR (%). Verifica-se que, independentemente da TxR e do tipo de água usada a variação do fluxo é semelhante, ou seja, ao longo da operação o fluxo diminui existindo assim um decréscimo da produção de água tratada. No entanto é de referir que, a maior diminuição do fluxo ocorre sensivelmente durante as primeiras 50 h de operação, após esse período o fluxo de água tende a estabilizar. Comparando o fluxo de permeado às diferentes TxR, tanto para a DW como para a DW+MC+ANTX, observa-se que a menor diminuição do fluxo ocorre à TxR 0% (cerca de 10% ao fim das 100 h de operação, figura 2). Em relação às TxR de 50% e 75% não há variação significativa no fluxo de permeado, apresentando um decréscimo do fluxo de cerca de 20% ao fim das 100h de operação (figura 2).

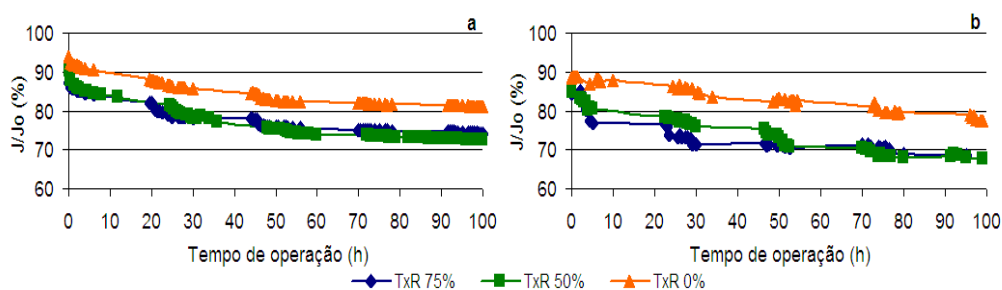


Figura 2 Variação do fluxo de permeado em função do tempo para as águas: a) DW+MC+ANTX e b) DW.

Na figura 3 encontra-se representada a remoção da condutividade para as diferentes taxas de recuperação de água e dois tipos de água. De uma forma geral, a remoção da condutividade manteve-se constante durante todo o ensaio independentemente da taxa de recuperação considerada. Conforme se pode observar, não há diferenças significativas na remoção entre o tipo de água (figura 3).

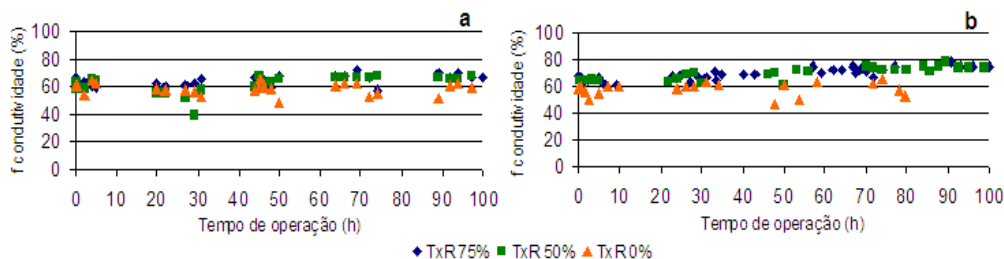


Figura 3 Remoção da condutividade em função do tempo de operação para as águas: a) DW+MC+ANTX e b) DW.

A remoção de DOC, como se pode observar na figura 4, manteve-se praticamente constante durante as 100h de operação, não apresentando variações significativas entre os dois tipos de água. A remoção de DOC situa-se acima dos 80% ao longo do ensaio para a DW e DW+MC+ANTX. Assim, a NF consegue uma boa remoção da matéria orgânica dissolvida.

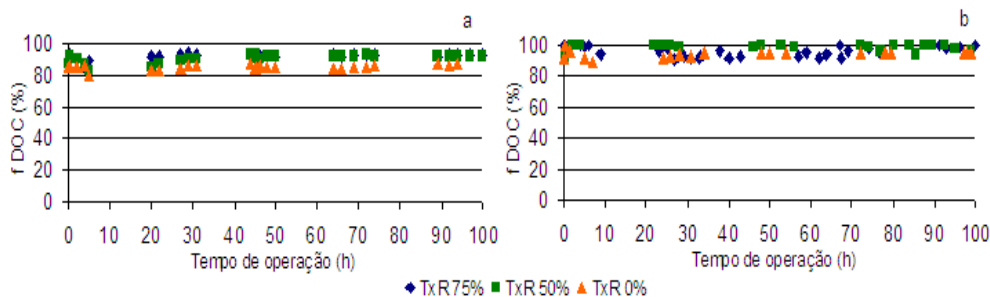


Figura 4 Remoção do DOC em função do tempo de operação para as águas: a) DW+MC+ANTX e b) DW.

Na figura 5 está representada a remoção das microcistinas (a) e anatoxinas (b) por NF. Tal como observado para os outros parâmetros estudados, a remoção de cianotoxinas mantém-se constante ao longo das 100h de operação sem variações significativas com a TxR. A anatoxina-a apresenta um valor de remoção relativamente menor do que a microcistina, apesar de elevado (> 80%). Este resultado deve-se ao tamanho da anatoxina-a (ca. 170 Da) relativamente ao da microcistina (ca. 1000 Da) e ao *cut-off* molecular da membrana (ca. 180 Da).

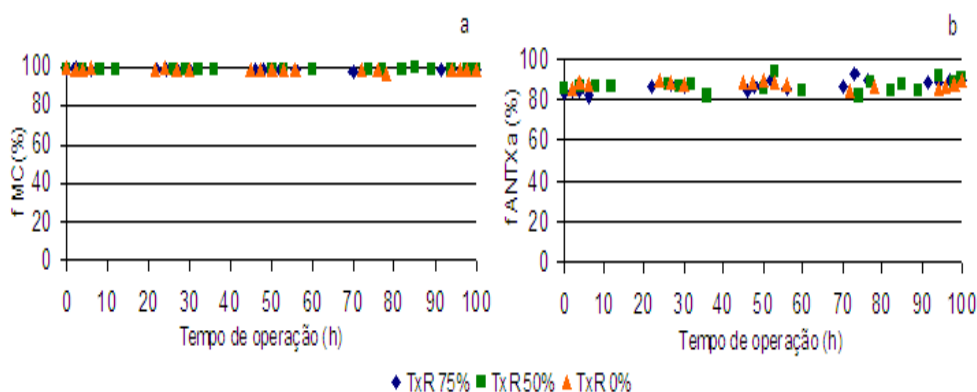


Figura 5 Remoção da microcistina (a) e anatoxina-a (b) em função do tempo de operação para a água DW+MC+ANTX.

Relativamente à qualidade do permeado para os diferentes tipos de água e TxR, apresentam-se os resultados no quadro 1.

Quadro 1 Síntese dos dados obtidos nos ensaios experimentais ao fim das 100 h de operação

TxR	0%				50%				75%			
	DW		DW+MC+ANTX		DW		DW+MC+ANTX		DW		DW+MC+ANTX	
Amostra	Cp	f (%)	Cp	f (%)	Cp	f (%)	Cp	f (%)	Cp	f (%)	Cp	f (%)
Condutividade (µS/cm)	237,7	58	251,0	59	267,2	70	306,6	62	284,0	70	325,7	65
DOC (mgC/l)	0,11	95	0,29	85	0,05	99	0,43	91	0,22	96	0,35	92
MC (µg/l)	-	-	0,16	99	-	-	0,12	99	-	-	0,10	99
ANTX (µg/l)	-	-	0,12	88	-	-	0,27	87	-	-	0,34	87
J/JO (%)	83		84		74		77		75		78	

Como se pode observar no quadro 1, os valores de condutividade do permeado para TxR de 75% oscilaram entre 284,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a DW e 325,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a DW+MC+ANTX. No entanto, comparando esse resultado com os valores legislados no Decreto-Lei (DL) n^o164 de 27 de Agosto de 2007 (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C), constata-se que o permeado apresenta uma mineralização adequada para o consumidor. Os valores médios DOC nos permeados das amostras de DW e DW+MC+ANTX com TxR de 75% correspondem respectivamente a 0,22 e 0,35 mgC/l (quadro1). Em relação aos valores de microcistina obtidos do permeado, 0,10 $\mu\text{g}/\text{l}$ para TxR de 75%, encontram-se dentro dos limites legais do DL n^o164 de 27 de Agosto de 2007 (1 $\mu\text{g}/\text{l}$). Para a anatoxina-a não existe limite legal em Portugal, mas os valores obtidos encontram-se sempre abaixo do valor guia existente na Nova Zelândia, designadamente 3 $\mu\text{g}/\text{l}$. Desta forma, verifica-se que o permeado também apresenta uma elevada qualidade em relação a estes parâmetros.

Após a análise dos resultados e de acordo com o finalidade da aplicação deste sistema de tratamento, onde se pretende obter a maior quantidade água tratada com um nível de qualidade para consumo humano, considerou-se que a unidade à escala real poderá operar com uma taxa de recuperação de 75%.

3.2 Estimativa dos custos

3.2.1 Custos actuais

Através da metodologia anteriormente descrita na secção 2 e dos dados fornecidos pela Águas do Algarve, S.A. relativos a 2008 e 2009, obteve-se um custo associado ao tratamento de água para consumo humano de cerca de 0,10 €/m³.ano, para o esquema de tratamento existente actualmente na ETA de Alcantarilha.

Na figura 6 encontra-se representado o contributo de cada componente do custo face ao custo total da ETA. Verifica-se que mais de metade do custo total, 56%, está associado a actividades de operação e manutenção (0,049 €/m³.ano), onde estão englobados tanto os custos com os recursos humanos, como a aquisição de materiais e serviços. No entanto, é de referir que cerca de metade dos custos da operação e manutenção, correspondem a serviços de manutenção exercidos por empresas externas especializadas (0,028 €/m³.ano), contratadas pelas Águas do Algarve, S.A., para promoverem a substituição e reparação do material danificado. A outra metade, 0,0019 €/m³.ano, recai sobre os custos associados à equipa interna responsável pela manutenção das várias unidades da linha de tratamento.

Seguidamente a componente que mais contribui para o custo total com 26% (0,023 €/m³.ano) corresponde ao consumo de reagentes necessários nas etapas de pré-oxidação, coagulação/floculação, desinfecção e tratamento de lamas. Neste sentido, a etapa que mais contribui para o custo total dos reagentes é a coagulação/floculação, com um custo total dos reagentes de 0,019 €/m³.ano. O reagente mais consumido nesta etapa é o coagulante, apresentando um custo de 0,015 €/m³.ano (mesmo não sendo o reagente mais caro 249 €/ton.ano). Por outro lado a adsorção também contribui consideravelmente para o custo desta etapa (0,004 €/m³.ano), pois o carvão activado é o reagente mais caro 1.082€/ton.ano apesar de não ser o reagente mais consumido.

O consumo energético representa actualmente 17% do custo total da ETA (0,015 €/m³.ano). No entanto, a maior fatia do custo energético está associado a actividades comuns a todas as etapas

como a iluminação do edifício, e dos sistemas manutenção e controlo da ETA, atingindo um custo de 0,012 €/m³.ano.

Neste estudo também se considerou os custos associados ao transporte e valorização das lamas provenientes da linha de tratamento com um custo total de 0,0011 €/m³, representando apenas 1% do custo total da ETA.

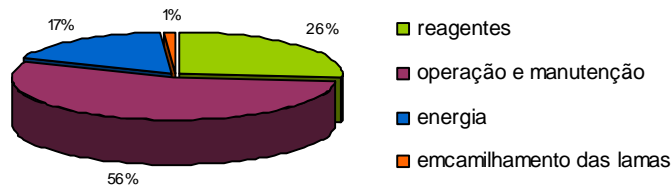


Figura 6 Percentagem de custo de cada componente sobre o custo total actual de tratamento na ETA de Alcantarilha

Na figura 7 está representado o contributo em percentagem dos custos de cada etapa da linha de tratamento sobre o custo total actual, que resulta da soma dos custos de cada componente anteriormente definida e repartiu-se igualmente os custos comuns a todas as etapas. Analisando a figura 7 observa-se que a etapa de coagulação/floculação é a que mais contribui para o custo total, representando cerca de 37% (0,029 €/m³.ano) do mesmo. Relativamente aos restantes 63% encontram-se repartidos pela pré-oxidação com 19% (0,016 €/m³.ano), pelo tratamento de lamas com 16% (0,013 €/m³.ano) e pela filtração e desinfecção que correspondem igualmente 14% (0,011 €/m³.ano) do custo total.

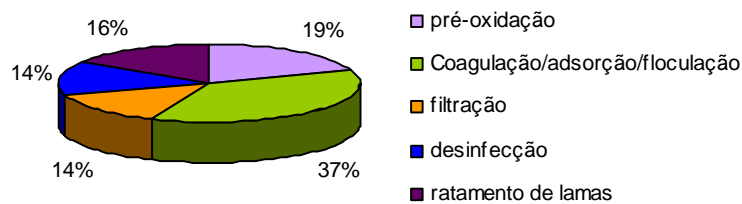


Figura 7 Proporção do custo de cada etapa da linha de tratamento sobre o custo total da ETA de Alcantarilha

3.2.2 Custos do sistema de NF

No quadro 2 encontram-se sintetizados os custos totais estimados para implementação da unidade de NF com uma capacidade de produção de 194.250 m³/d face a um caudal de alimentação de 259.000 m³/d (TxR de 75%). Verifica-se que o custo total estimado associado ao sistema de NF é de 0,14 €/m³. No entanto a componente que apresenta um maior peso sobre o valor total por metro

cúbico de água tratada recai sobre os custos de operação e manutenção (0,117€/m³). Este facto pode estar relacionado com a capacidade de produção da unidade de NF, visto que para unidades de maior capacidade (>3800 m³/d) o custo de investimento é tipicamente inferior principalmente face ao custo de operação e manutenção devido à facilidade do fabrico dos equipamentos associados a uma maior escala (Sethi *et al.*2000).

Quadro 2 Síntese dos parâmetros e custos associados à implementação da unidade de NF

Capacidade de produção (m ³ /d)	194.250
TxR (%)	75
Pressão (bar)	10
Custo de Investimento (€)	14.714.439
Amortização do capital de investimento (€/m ³)	0,024
Custos de operação e manutenção (€/m³)	0,117
Energia	0,040
Manutenção	0,010
Substituição das membranas	0,017
Químicos	0,010
Deposição do concentrado	0,040
Custo total (€/m³)	0,14

O custo estimado para a construção e instalação da unidade de NF foi de 14.714.439 € tendo em conta o caudal máximo previsto para a ETA de Alcantarilha no ano de horizonte de projecto (259.000 m³/d) e a TxR de 75%. No entanto, é de referir que esta metodologia não entra em conta com o dimensionamento da instalação de NF. De qualquer forma, os resultados obtidos são semelhantes aos resultados apresentados por COSTA e PINHO (2006) para uma unidade de NF com capacidade de produzir 100.000 m³/d de água tratada, com um custo de investimento de 17.610.716 € e um custo total por metro cúbico de água tratada de 0,214 €/m³.

A implementação do sistema de nanofiltração na ETA de Alcantarilha prevê a alteração da linha de tratamento existente, adoptando a seguinte sequência: pré-oxidação, coagulação/floculação/decantação, nanofiltração, desinfecção e tratamento de lamas. Desta forma substitui-se a filtração e adsorção por PAC pela nanofiltração, mantendo-se as restantes etapas com as mesmas características do tratamento actual.

No sentido de avaliar o impacto a nível económico da implementação da NF na actual linha de tratamento da ETA, tendo em conta a sequência de tratamento referida anteriormente, somou-se os custos inerentes ao sistema de NF (quadro 2) com os custos actuais comuns aos dois esquemas de tratamento determinados na secção 3.2.1 (pré-oxidação, coagulação/floculação/decantação e tratamento de lamas).

Neste trabalho avaliou-se o custo do sistema de NF com diferentes capacidades de produção de forma a analisar o seu reflexo no custo anual (amortização) do tratamento com NF se a ETA continuar a operar com mesma produção (ano de 2009) ou se operar com a produção prevista para o horizonte de projecto. No quadro 3 encontram-se resumidos os resultados da estimativa dos custos totais para o tratamento actual com uma produção de 800.72 m³/d (no ano de 2009), os custos do tratamento da NF para uma produção de 60.054 m³/d (TxR de 75%) com um caudal de

alimentação de 800.72 m³/d, e para a capacidade de produção de 194.250 m³/d (TxR de 75%) tendo em conta o caudal máximo previsto para a ETA de Alcantarilha no ano de horizonte de projecto (259.000 m³/d).

Analisando o quadro 3 verifica-se que o valor estimado para o custo só da NF considerando que a ETA de Alcantarilha passasse a produzir 75% da água tratada no ano de 2009 (60.054 m³/d) é de 0,194 €/m³ reflectindo uma amortização do custo de implementação de 0,078 €/m³. Na sua capacidade máxima, 194.250 m³/d, o valor da amortização é menor, 0,024 €/m³, uma vez que o mesmo custo de investimento é repartido por um maior volume de água produzida.

Os custos totais da linha de tratamento com o sistema de NF, para uma produção de 60.054 m³/d (ano 2009), é de 0,26 €/m³, que é superior ao custo do tratamento actual, 0,10 €/m³ (quadro 3). Verifica-se que esta alteração proporciona um acréscimo de 0,17 €/m³ face ao custo do tratamento actual, em 2009. No entanto se a ETA funcionar na sua capacidade máxima, para o ano dce 2025, o acréscimo face ao custo actual é de apenas 0,12 €/m³. Este acréscimo poderá ser compensado com o nível de qualidade da água obtida face às novas exigências legais e satisfação do consumidor final.

Quadro 3 Custos totais do sistema de tratamento actual e com NF para as diferentes produções

Custo (€/m ³)	Produção (m ³ /d)	
	194.250	60.054
Pré-oxidação	0,016	
Coagulação/floculação	0,025	
Nanofiltração	0,140	0,194
Desinfecção	0,011	
Tratamento de lamas	0,013	
Custo total do tratamento com NF	0,21	0,26
Custo total do tratamento actual	0,10	
Acréscimo	0,12	0,17

No entanto é de referir que o custo total estimado para o tratamento com a NF deve de diminuir, já que uma das principais vantagens da NF consiste na diminuição na utilização de produtos químicos no tratamento (KAWAMURA, 2000). Desta forma, os custos da etapa de coagulação/floculação e desinfecção poderão sofrer uma diminuição significativa, visto que correspondem ao processo onde ocorre o maior consumo de reagentes, como se verificou na secção 3.2.1. Assim sendo e consequentemente a etapa de tratamento de lamas, essencialmente provenientes do processo de coagulação/floculação, também terá um custo inferior ao estimado actualmente. Estudos recentemente realizados demonstraram que a NF poderá funcionar com água ozonizada da ETA de Alcantarilha, portanto sem a etapa de coagulação/floculação, já que o permeado apresentou elevada qualidade com houve uma ligeira diminuição do fluxo de permeado (RIBAU TEIXEIRA e ROSA, 2005, RIBAU TEIXEIRA e ROSA, 2006).

De acordo com estas evidências o próximo passo deste estudo será avaliar economicamente o sistema de NF tendo apenas como pré-tratamento a pré-oxidação e o redimensionamento das etapas comuns ao sistema actual de acordo com a nova qualidade de água obtida, principalmente nas etapas posteriores ao sistema de NF como são o caso desinfecção e tratamento de lamas.

Por último será também necessário avaliar economicamente o aumento da TxR para 90%, já que a maioria das unidades de NF estudadas apresentam um taxa de recuperação superior a 80% mantendo os níveis de qualidade de água obtida exigidos, como é referenciado no estudo de LIIKANEN *et al.* (2006) com uma TxR de 83%, no de COSTA e PINHO (2006) com TxR de 90% e no de ELAZAR *et al.* (2009) com uma TxR de 84%. Desta forma para otimizar o processo de NF será importante operar com uma taxa de recuperação superior e avaliar qual o seu impacto a nível do custo da sua implementação.

4 CONCLUSÃO

Com a realização deste estudo concluiu-se que a ETA de Alcantarilha actualmente tem um custo de tratamento de 0,10 €/m³ de água tratada, em que 37% está associado à etapa de coagulação/floculação/decantação, 19% à pré-oxidação, 16% ao tratamento de lamas e 14% a ambas as etapas de filtração e desinfecção.

O sistema de NF a instalar na ETA de Alcantarilha deve operar com uma taxa de recuperação de água maior ou igual a 75%. Os resultados demonstraram que a esta taxa de recuperação, a NF apresenta um bom desempenho em termos de quantidade e qualidade de água tratada, designadamente 99% de remoção de microcistinas, 87% de anatoxina-a, 70% de condutividade para a DW e 65% para a DW+MC+ANTX, e 96% de DOC para a DW e 92% para a DW+MC+ANTX.

O custo da NF (que inclui custos de investimento, operação e manutenção) com uma capacidade máxima de produção de 194.250 m³/d face a um caudal de alimentação de 259.000 m³/d (TxR de 75%) é de 0,14 €/m³, concluindo-se que os custos de manutenção e operação são superiores aos de capital. O custo total da linha de tratamento com NF (pré-oxidação, coagulação/floculação, nanofiltração, desinfecção e tratamento de lamas) é de 0,21 €/m³, o que revela um acréscimo de 0,12 €/m³. Este acréscimo poderá ser compensado com o nível de qualidade da água obtida face às novas exigências legais e satisfação do consumidor final.

O sistema de NF apresenta uma relação custo/benefício que permite concluir que a sua implementação é economicamente viável, uma vez que consegue uma elevada qualidade da água com remoção de substâncias com riscos para a saúde pública, substâncias estas que o tratamento convencional não consegue remover.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Projecto n.º PTDC/ECM/68323/2006-NFPilotCYANO). Agradece-se à Vânia Sousa pelas análises realizadas nos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHAM, S.S., JACANGELO, F.G., LAÏNÉ, J.-“Characteristics and costs of MF and UF plants”. J. Am. Water Works Assoc. 88(5), 1996, pp.22.

ÁGUAS DO ALGARVE – AdA (2009) – Grupo Águas de Portugal. Disponível na World Wide Web: <<http://www.aguasdoalgarve.pt>> em formato HTML (acedido em Janeiro de 2010).

ALI, N.; MOHAMMAD, A. W.; AHMAD, A.L. - “Use of nanofiltration predictive model for membrane selection and system cost assessment”. Separation and Purification Technology, **41**, 2005, pp. 29–37.

COSTA, A. R.; PINHO, M.N. - “Performance and cost estimation of nanofiltration for surface water treatment in drinking water production”. Desalination, **196**, 2006, pp. 55–65

ELAZHAR F.; TAHAIKT M., ACHATEI A.; ELMIDAQUI F.; TAKY M.; EI HANNOUNI F.; LAAZIZ I.; JARIRI S.; EI AMRANI M.; ELMIDAQUI A.- “Economical evaluation of the fluoride removal by nanofiltration”. Desalination, **249**, 2009, pp. 154–157.

GERALDES V.; PINHO M.N. -“Process water recovery from pulp bleaching effluents by an NF/ED hybrid process.” Journal of Membrane Science, 102, 1995, pp. 209-221.

GORENFLO, A.; VELAZQUEZ-PADRÓN, D.; FRIMMEL, F. H.- “Nanofiltration of a German groundwater of high hardness and NOM content, performance and costs”. Desalination, **151**, 2002, 253–265.

KAWAMURA, S.- “Integrated Design and Operation of Water treatment Facilities”. John Wiley & Sons, Inc., New York, E.U.A., 2000, pp. 691.

LIIKANEN, R.; YLI-KUIVILA, J.; TENHUNEN, J.; LAUKKANEN, R.- “Cost and environmental impact of nanofiltration in treating chemically pre-treated surface water”. Desalination, **201**, 2006, pp. 58–70.
RAUTENBACH R., GRÖSCH A.. -“Separation potential of nanofiltration membranes”. Desalination **77**, 1990, pp. 73.

LUCAS, H., COELHO, M.R., VIRIATO, S.M., SANCHO, R., CARAPUÇA, M.F. - “Qualidade da água de processo no arranque da estação de tratamento de água (ETA) de Alcantarilha” in Actas da Conferência Internacional sobre a água (IWC2001), Porto (Portugal), 2001.

MULDER, M.- Basic Principles of Membrane Technology, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers Netherlands, 1997.

RIBAU TEXEIRA, M., ROSA, M.J. - “Microcystins removal by nanofiltration membranes”. Separation and Purification Technology, **46**(3), 2005, pp. 192-201.

RIBAU TEXEIRA, M., ROSA, M.J., NYSTROM, M. - “The role of membrane charge on nanofiltration performance”. Journal of Membrane Science, **265**, 2005, pp. 160-166.

RIBAU TEXEIRA, M., ROSA, M.J. - "Neurotoxic and hepatotoxic cyanotoxins removal by nanofiltration membranes". *Water Research*, **40**(15), 2006, pp. 2837-2846.

SETHI S.; WIESNER Mark R.- "Cost Modeling and Estimation of Crossflow Membrane Filtration Processes". *Environmental engineering science*, **17**-2, 2000, pp.61-79.